

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 556.535

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕК РОСТОВСКОЙ ОБЛАСТИ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

А.Э. Сумачев¹, Г.В. Пряхина², М.В. Сыромятина³, М.Р. Кузнецова⁴,
А.А. Павловский⁵, Т.Н. Осипова⁶, И.Г. Матвеева⁷, Н.А. Лемешко⁸

^{1–8} Санкт-Петербургский государственный университет, институт наук о Земле

⁴ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт

¹ Кафедра гидрологии суши, ст. преподаватель, канд. техн. наук; e-mail: a.sumachev@spbu.ru

² Кафедра гидрологии суши, доц., зав. кафедрой гидрологии суши, канд. геогр. наук; e-mail: g65@mail.ru

³ Кафедра гидрологии суши, доц., канд. геогр. наук; e-mail: m.syromyatina@spbu.ru

⁴ Отдел океанологии, вед. инженер; e-mail: rotefliege@mail.ru

⁵ И. о. зав. кафедрой климатологии и мониторинга окружающей среды;
доц., д-р геогр. наук; e-mail: a.a.pavlovsky@spbu.ru

⁶ Кафедра климатологии и мониторинга окружающей среды, доц., канд. геогр. наук; e-mail: t.osipova@spbu.ru

⁷ Кафедра климатологии и мониторинга окружающей среды, ст. преподаватель; e-mail: i.matveeva@spbu.ru

⁸ Кафедра климатологии и мониторинга окружающей среды, доц., канд. геогр. наук; e-mail: n.lemeshko@spbu.ru

В пределах административных границ Ростовской области рассмотрено изменение температуры воздуха и осадков, а также расходов и уровней воды за 1966–2019 гг. по шести метеорологическим станциям и 30 речным гидрологическим постам. Выявлено статистически значимое увеличение среднегодовой температуры воздуха. За 54 года повышение среднегодовой температуры воздуха составило в среднем 0,38°C/10 лет, наиболее существенно оно проявляется в январе (0,68°C/10 лет). Значимых изменений годового количества осадков за весь период выявлено не было, также в целом не наблюдаются они и в отдельные месяцы. Однако, если рассматривать последнее тридцатилетие, то в целом по области обращает на себя внимание уменьшение годовых сумм осадков (–24,9 мм/10 лет), которое, в свою очередь, по-разному проявляется в разных районах области. Наиболее существенно оно выражено в юго-западных и южных районах: Таганрог (–46,3 мм/10 лет), Ростов-на-Дону (–35 мм/10 лет), Гигант (–47,8 мм/10 лет), менее выражено в юго-восточных районах: Ремонтное (–7,6 мм/10 лет).

В связи с уменьшением увлажненности территории на подавляющем большинстве рек наблюдается снижение среднегодовых расходов и уровней воды, при этом на реке Дон отмечается перераспределение стока внутри года. Показано, что уровеньный режим рек во многом зависит от комплекса климатических, гидрологических и водохозяйственных факторов, и его изменение, как правило, более выражено по сравнению с изменением расхода воды. Анализ максимальных расходов воды показал наличие статистически значимых отрицательных трендов на большинстве гидрологических постов со средним коэффициентом корреляции –0,33, значимые положительные тренды не выявлены. Анализ высших уровней воды показал наличие статистически значимых отрицательных трендов также на большинстве постов со средним коэффициентом корреляции –0,35. Повторяемость превышения отметок опасного явления (наводнений), рассчитанная за многолетний период, составляет от 0 до 26%, средние превышения опасных отметок от 7 до 74 см. В связи с повсеместным снижением максимальных расходов и высших уровней воды уменьшается вероятность возникновения опасных гидрологических явлений (ОГЯ), связанных с прохождением волны половодья, с другой стороны, продолжение роста температуры воздуха и уменьшение количества осадков может привести к существенному снижению водности рек в будущем.

Ключевые слова: расход воды, уровень воды, бассейн нижнего Дона, наводнения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.6.8

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последнего столетия климатические условия претерпевают значительные изменения, что установлено как для отдельных районов,

так и в глобальном масштабе [State of the global..., 2022]. Поскольку климат является одним из основных факторов, определяющих гидрологический режим водных объектов, эти изменения неизбежно

находят проявление в изменениях сроков ледостава, водности, уровня режима, повторяемости ОГЯ процессов и др. [Базельюк, 2012; Дмитриева, 2018; Литвинов, Дмитриева, 2019; Kireeva et al., 2019a; Фролова и др., 2020; Научно-прикладной справочник..., 2021; Третий оценочный доклад..., 2022]. Деятельность человека вносит дополнительный вклад в режимные изменения гидрологических объектов: преобразование водосборов, создание водохозяйственных систем, регулирование стока и др. Таким образом, изучение гидрологического режима водных объектов в условиях современных изменений климата в засушливых районах, требующих обеспечения значительным количеством воды, является задачей, имеющей как теоретическое, так и практическое значение.

Одной из таких территорий России является Ростовская область, где в результате уже наблюдаемых, а в дальнейшем прогнозируемых по различным сценариям изменений климатических характеристик создаются риски для населения, экономики и природной среды, растет повторяемость опасных гидрометеорологических явлений (аномальная жара, ливневые осадки, засухи, ураганы), возникает угроза опустынивания части территории и уменьшения водности рек.

Климатические изменения и особенности водного режима отдельных рек Ростовской области ранее были рассмотрены различными авторами [Лурье, 2010; Киреева, Фролова, 2013; Георгиади и др., 2017; Киреева и др., 2017; Киреева и др., 2018; Георгиевский и др., 2019; Георгиади и др., 2020; Фролова и др., 2022; Фролова и др., 2023]. Так, согласно [Лурье, 2010], наиболее значительный положительный тренд температуры воздуха был выявлен для холодного периода, в то время как за теплый период повсеместно отмечался отрицательный тренд температуры воздуха. Тренды в рядах годовых сумм осадков, а также за теплый и холодный периоды были положительными практически на всей территории области. При этом к 2020 г. можно было ожидать увеличение среднемесячной температуры воздуха за январь на 2,7°C, за июль на 4,0°C, годовая сумма осадков при этом должна была возрасти на 100 мм. Сток реки Дон согласно [Лурье, Панов, 1999] должен был снизиться к 2020 г., в то время как сроки появления льда становились более поздними, а вскрытия – более ранними. К 2020 г. ожидалось уменьшение продолжительности периода с ледовыми явлениями, которое станет более заметным к 2050 г. Наиболее значительно должно было измениться внутригодовое распределение стока: предполагалось его резкое уменьшение в весенний период и увеличение в летне-осенний и наиболее значимо в зимний. Похожие результаты были полу-

чены в работе [Kireeva et al., 2019b] на основе обработки данных наблюдений. В работе [Корнилов и др., 2017] рассмотрены экологические проблемы и гидрологические особенности рек Сал и Северский Донец (в пределах Ростовской области).

Анализ литературного материала показал, что выполненные оценки относились к ограниченному количеству водных объектов Ростовской области. Кроме того, с момента публикаций были накоплены дополнительные данные гидрометеорологических измерений, и в 2022 г. Росгидрометом был выбран новый базовый период для расчета климатических норм 1991–2020 гг.¹

Целью настоящей работы стала оценка многолетних изменений характеристик водного режима рек Ростовской области с учетом актуальных данных метеорологических и гидрологических наблюдений и расширенного перечня объектов. Особый интерес представляет выявление и сравнение современных тенденций с результатами долгосрочных прогнозов на 2020–2030 гг., представленных в литературных материалах. Исследование проводилось в рамках подготовки Регионального плана адаптации к изменениям климата Ростовской области, утвержденного распоряжением правительства Ростовской области № 285 от 11.05.2022, разработанного в целях формирования системы оперативных и долгосрочных мер адаптации к изменениям климата, реализуемых на уровне субъекта РФ. Коллектив авторов данной статьи принимал участие в подготовке материалов по научному обоснованию данного документа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования. Ростовская область расположена на юге Восточно-Европейской равнины и частично в Предкавказье, в бассейне нижнего Дона. По характеру поверхности территория области представляет собой равнину, расчлененную долинами рек и балками. Максимальная высота над уровнем моря – 253 м. На территории Ростовской области отмечается в целом однородный температурный режим с ярко выраженным годовым ходом температуры и отчетливой сменой сезонов. Средняя годовая температура колеблется от 8,5°C на севере области до 10,8–10,9°C на юге и юго-западе. Наиболее холодный месяц на территории Ростовской области – январь (диапазон температур от –5,3°C на севере области до –2,6°C на юго-западе, вблизи Таганрогского залива). Самым жарким месяцем является июль, средняя температура которого изменяется от 22,5°C на севере области до 24,9°C на юге. Средняя много-

¹ О переходе на новые климатические нормы // Росгидромет. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/28963/>.

летняя годовая амплитуда составляет по области 27,7°C. На всей территории Ростовской области положительные температуры отмечаются с марта по ноябрь. Область характеризуется засушливым климатом, особенно резко выраженным на юго-востоке. Увеличение засушливости климата в восточном направлении связано с усилением континентальности и влиянием полупустынных и пустынных районов Средней Азии. Годовая сумма осадков изменяется по территории от 510 до 336 мм, гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова изменяется от 0,77 на севере области до 0,56 на юго-востоке. По условиям влагообеспеченности на территории Ростовской области выделяются два района: очень засушливый на востоке и засушливый на западе [Агроклиматические ресурсы Ростовской области, 1972]. Близость Азовского моря частично определяет температурные характеристики и режим увлажнения. Климат территорий, расположенных на побережье Таганрогского залива, характеризуется рядом особенностей. На станциях, расположенных вблизи побережья, влагосодержание воздуха выше, чем на удаленных. Средние многолетние значения парциального давления водяного пара в июле достигают 18,1 гПа (станция Таганрог), при удалении от побережья значения уменьшаются до 16,5 гПа (станция Ростов-на-Дону) и 15,3 гПа (станция Ремонтное). Для климата побережья характерны сглаженные колебания температуры воздуха с меньшими абсолютными экстремальными значениями. Так, средняя месячная минимальная температура в январе в Таганроге –3,0°C, а на станции Ремонтное –4,1°C. Абсолютный минимум температуры воздуха за период 1991–2020 гг. в Таганроге –27,2°C, на станции Ремонтное –33,8°C. Абсолютный максимум температуры воздуха за тот же период в Таганроге +40,5°C, на станции Ремонтное +43,2°C. При продвижении от побережья к востоку индекс континентальности Н.Н. Иванова увеличивается от 170 в Таганроге до 182 в Ремонтном.

В пределах Ростовской области в бассейне р. Дон протекает около 4600 рек. Это в основном средние и малые реки. Климатические условия, рельеф местности и гидрогеологические особенности территории обусловили относительно слабое развитие гидрографической сети. Густота речной сети составляет 0,1–0,6 км/км². Средний годовой сток составляет 26,2 км³, максимальный – 50,9 км³, минимальный – 10,9 км³. Водный режим многих рек изменен искусственно. На территории области имеется 173 водохранилища емкостью от 1 до 10 млн м³ и 14 водохранилищ емкостью более 10 млн м³ [Итоговый отчет..., 2012]. Внутригодовое распределение стока характеризуется весенним половодьем, проходящим с марта по апрель, достаточно глубокой летней меженью вплоть

до пересыхания малых рек и осенними паводками, переходящими в зимнюю межень.

Материалы. В качестве исходной информации в работе использованы гидрометеорологические данные (ряды среднемесячных значений приземной температуры воздуха, сумм осадков, уровней и расходов воды, максимальных значений расходов и уровней воды) за период с 1966 по 2019 г., находящиеся в свободном доступе на официальных сайтах² по шести метеорологическим станциям и 30 речным постам (из них 24 поста первого разряда) (рис. 1). Отметим, что в работе рассмотрены все реки Ростовской области, на которых ведутся непрерывные наблюдения за элементами гидрологического режима.

Так как гидрологические данные за 1989, 1991–1992, 2005–2007 гг. не были представлены в библиотеке ФГБУ «ГГИ», расчеты выполнялись с учетом пропусков в наблюдениях. Восстановление пропусков по рекам-аналогам не представлялось возможным ввиду отсутствия данных гидрологических наблюдений за эти годы.

Методы. Анализ представленных гидрологических и метеорологических характеристик выполнен методом математической статистики [Сикан, 2007].

Оценка основных климатических параметров выполнена на основе анализа многолетних особенностей метеорологического режима [Кобышева, Наровлянский, 1978]. Весь анализируемый период наблюдений был разбит на два – базовый и контрольный. Базовый период наблюдений – с 1966 по 1990 г. – подразумевает стационарность климатических и, как следствие, гидрологических характеристик, являясь фоновым при оценке влияния климата на гидрологический режим водных объектов. Контрольный – с 1991 по 2019 г. – выбран в соответствии с рекомендациями Росгидромета для расчета новых климатических норм с учетом наличия данных наблюдений.

Для описания метеорологического режима территории было использовано обобщение значений метеорологических величин и их характеристик месячного и годового разрешения. Методика получения обобщенных характеристик метеорологических величин за конкретные временные периоды является единой независимо от используемых средств измерений и способа обработки (ручного или автоматизированного).

² Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ – МЦД). Исходная гидрологическая информация для анализа была получена из различных официальных источников: среднемесячные значения уровней и расходов воды за 1966–2005 гг. собраны по материалам государственного водного кадастра, представленного в библиотеке ФГБУ «ГГИ», данные за 2008–2019 гг. получены по материалам сайта ЕАИС ГМВО.

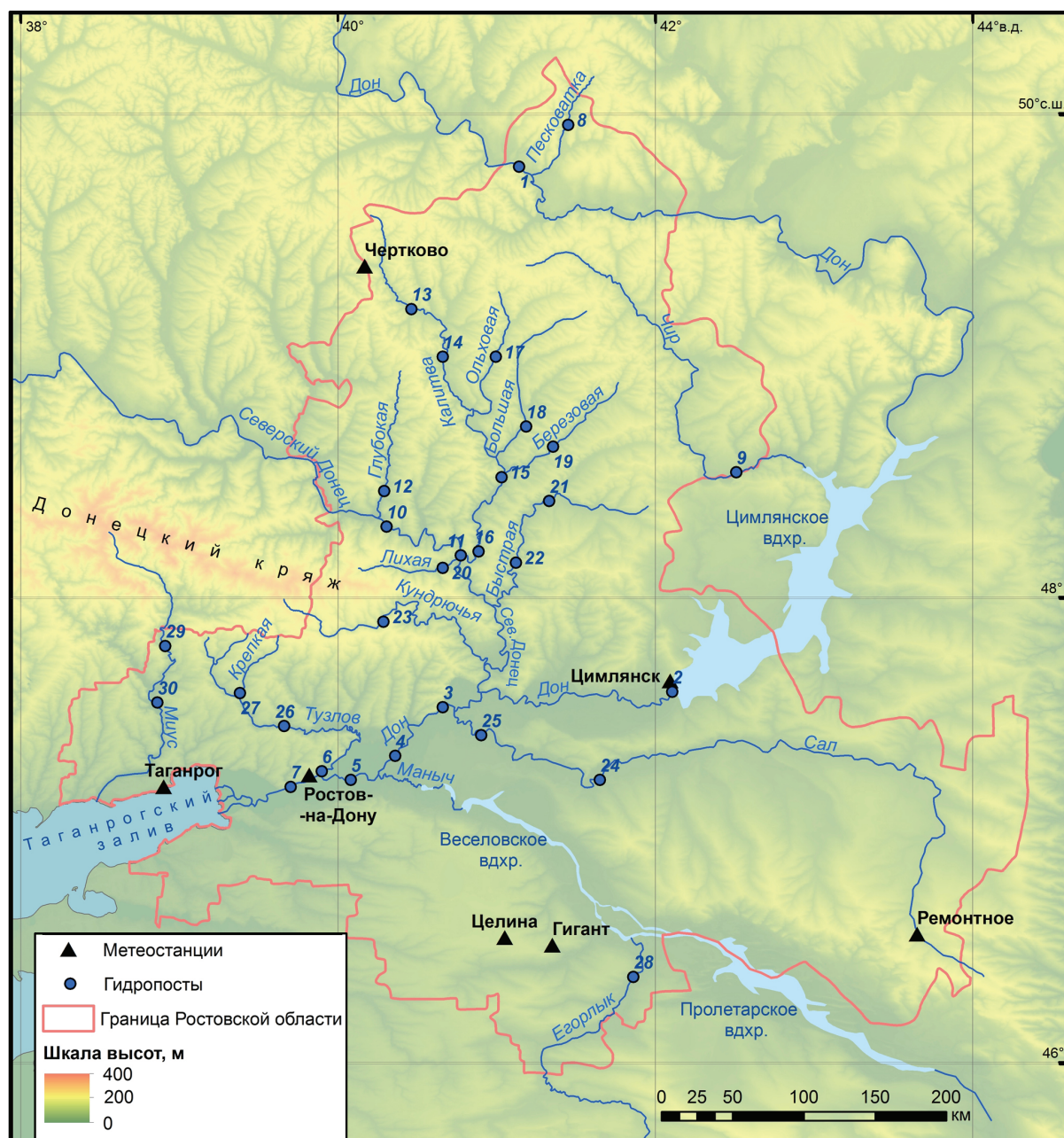


Рис. 1. Район исследования:

- 1 – ст. Казанская (р. Дон); 2 – Цимлянская ГЭС, нижний бьеф (р. Дон); 3 – Раздорская (р. Дон); 4 – Багаевский (р. Дон); 5 – Старочеркасская (р. Дон); 6 – Аксай (р. Дон); 7 – Ростов-на-Дону (р. Дон); 8 – Шумилинская (р. Песковатка); 9 – Обливская (р. Чир); 10 – Каменск-Шахтинский (р. Северский Донец); 11 – Белая Калитва (р. Северский Донец); 12 – Астаховский (р. Глубокая); 13 – Кудиновка (р. Калитва); 14 – Ольховый Рог (р. Калитва); 15 – Раздолье (р. Калитва); 16 – Погорелов (р. Калитва); 17 – Кашары (р. Ольховая); 18 – Индустрия (р. Большая); 19 – Антоновка (р. Березовая); 20 – Богураев (р. Лихая); 21 – Скосырская (р. Быстрая); 22 – Апанаскин (р. Быстрая); 23 – Владимировская (р. Кундрючья); 24 – Большая Мартыновка (р. Сал); 25 – Балабинка (р. Сал); 26 – Несветай (р. Тузлов); 27 – Большекрепинская (р. Крепкая); 28 – Новый Егорлык (р. Егорлык); 29 – Куйбышево (р. Миус); 30 – Матвеев Курган (р. Миус)

Fig. 1. Study area:

- 1 – Kazanskaya (Don river); 2 – Tsimlyanskaya hydroelectric station, downstream (Don river); 3 – Razdorskaya (Don river); 4 – Bagaevsky (Don river); 5 – Starocherkasskaya (Don river); 6 – Aksai (Don river); 7 – Rostov-on-Don (Don river); 8 – Shumilinskaya (Peskovatka river); 9 – Oblivskaya (Chir river); 10 – Kamensk-Shakhtinsky (Seversky Donets river); 11 – Belaya Kalitva (Seversky Donets river); 12 – Astakhovsky (Glubokaya river); 13 – Kudinovka (Kalitva river); 14 – Alder Horn (Kalitva river); 15 – Razdolie (Kalitva river); 16 – Pogorelov (Kalitva river); 17 – Kashary (Olkhovaya river); 18 – Industry (Bolshaya river); 19 – Antonovka (Berezovaya river); 20 – Bogurayev (Likhaya river); 21 – Skosyrskaya (Berezovaya river); 21 – Skosyrskaya (Berezovaya river); Bystraya; 22 – Apanaskin (Bystraya river); 23 – Vladimirovskaya (Kundryuchya river); 24 – Bolshaya Martynovka (Sal river); 25 – Balabinka (Sal river); 26 – Nesvetai (Tuzlov river); 27 – Bolshekrebinskaya (Krepkaya river); 28 – New Yegorlyk (Egorlyk river); 29 – Kuibyshevo (Mius river); 30 – Matveev Kurgan (Mius river)

Для анализа изменчивости характеристик гидрологического режима за весь период наблюдений по срочным, среднемесячным и среднегодовым значениям расходов и уровней воды были оценены статистические значимости линейных трендов, для чего были рассчитаны значения коэффициента корреляции Пирсона и его критические значения [Малинин, 2008]. Критическое значение коэффициента корреляции при уровне значимости 5% было рассчитано по формуле

$$R_{\text{крит}} \approx \frac{2}{\sqrt{n+2}}, \quad (1)$$

где n – фактическая длина рядов наблюдений (в среднем критическое значение коэффициента корреляции равно 0,27). Подобный подход позволяет, как правило, выявить статистически значимые тренды на отдельно взятых постах. В случаях, когда рассматриваются среднемесячные значения расходов или уровней воды на множестве гидрологических постов, тренды, оцененные за какой-либо месяц, могут оказаться статистически незначимыми (т. е. отклонение выборочного значения коэффициента корреляции от нуля лежит в пределах статистической погрешности его определения). Уменьшение погрешности определения выборочных значений коэффициентов корреляции возможно в случае осреднения их значений по группе рек с похожими условиями формирования стока. Целесообразным является осреднение преимущественно незначимых коэффициентов корреляции. В случаях отсутствия линейных трендов среднее по группе рек значение коэффициента корреляции должно быть равно нулю. Для проверки гипотезы о равенстве среднего значения заданному числу применяется одновыборочный тест Стьюдента [Сикан, 2007]. Для реализации данного подхода рассчитывались средние по группе рек коэффициенты корреляции линейных трендов среднемесячных расходов или уровней воды ($R_{\text{ср}}$), которые в случае отсутствия трендов должны быть равны нулю (так как разнонаправленные тенденции, обусловленные погрешностями статистических расчетов, взаимно компенсируются). Эмпирическое значение t статистики рассчитывается по формуле:

$$t = \frac{R_{\text{ср}} - m}{\sigma_x / \sqrt{n}}, \quad (2)$$

где m – теоретическое значение среднего коэффициента корреляции, которое при отсутствии трендов равно нулю.

Однородность рядов по дисперсии проверялась с помощью двухвыборочного теста Фишера, по среднему значению – двухвыборочного теста Стьюдента.

Для обоих тестов были рассчитаны значения p -value, представляющие минимальный уровень значимости опровержения нулевой гипотезы о равенстве двух характеристик. Принятый уровень значимости, использованный в работе, составляет 5%.

Повторяемость ОГЯ (наводнений) рассчитывалась как отношение числа лет, в которые превышались опасные отметки уровней воды, к общему числу лет. Величина отметок ОЯ бралась по данным ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» [Перечень опасных природных..., 2024].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка основных гидрометеорологических характеристик территории Ростовской области.

В целом по Ростовской области за период с 1966 по 2019 г. произошло статистически значимое повышение среднегодовой температуры приземного воздуха, которое в разных районах области проявилось во все центральные месяцы сезонов (кроме апреля в южной части области). За 54 года повышение среднегодовой температуры воздуха составляет в среднем 0,38°C/10 лет, наиболее существенно оно проявляется в январе (0,68°C/10 лет). В табл. 1 представлены оценки линейного тренда для приземной температуры воздуха для периодов 1966–2019 и 1991–2019 гг. Значимость трендов оценивалась на уровне 5%.

Значимых изменений годового количества осадков за период с 1966 по 2019 г. выявлено не было, также и за отдельные месяцы за некоторым исключением (табл. 2). Однако если рассматривать последнее тридцатилетие, то в целом по области обращает на себя внимание уменьшение годовых сумм осадков, которое, в свою очередь, по-разному проявляется в разных районах области. Наиболее существенно оно выражено в юго-западных и южных районах: Таганрог (–46,3 мм/10 лет), Ростов-на-Дону (–35 мм/10 лет), Гигант (–47,8 мм/10 лет), менее выражено в юго-восточных районах: Ремонтное (–7,6 мм/10 лет). Также были выявлены и значимые положительные тренды сумм осадков, но в отдельные месяцы, для станций Гигант, Ремонтное, Таганрог, Чертково. В таблице 2 представлены оценки линейного тренда для атмосферных осадков для периодов 1966–2019 и 1991–2019 гг. Значимость трендов оценивалась на уровне 5%.

Анализ гидрологических изменений. Водный режим. Анализ стационарности рядов среднегодового стока показал, что гипотеза о стационарности опровергается по критериям Стьюдента и Фишера для 12 и 25% рассмотренных рядов соответственно. Статистически значимые отрицательные тренды выявлены для 21% водотоков – реки Березовая, Лихая, Быстрая (только по г. п. Скосырская) и Сал. Аномальным представляется статистически значи-

мое увеличение расходов воды реки Песковатки по данным гидрологического пункта Шумилинская за все месяцы года, включая среднегодовые расходы воды. Также тенденция к незначительному увеличению расходов воды была выявлена для рек

Егорлык и Крепкая. В остальных случаях отмечена тенденция к снижению среднегодовых расходов воды – средний районный коэффициент корреляции линейного тренда равен 0,20, что статистически значимо отличается от нуля.

Таблица 1

Оценки линейного тренда для приземной температуры воздуха для различных периодов

Месяц	1966–2019 гг.			1991–2019 гг.		
	<i>k</i>	<i>D</i>	Δt	<i>k</i>	<i>D</i>	Δt
<i>Станция «Гигант» (34 740)</i>						
Январь	0,7	9	4	0,2	0,4	0,6
Апрель	–0,07	0,3	–0,4	0,05	0,07	0,2
Июль	0,4	15	2	0,7	12	2
Октябрь	0,4	8	2	0,3	2	0,8
Год	0,4	30	2	0,8	49	2
<i>Станция «Ростов-на-Дону» (34 730)</i>						
Январь	0,6	10	3	0,2	0,5	0,7
Апрель	–0,1	0,3	–0,4	0,4	3	1
Июль	0,3	10	2	0,6	7	2
Октябрь	0,3	7	2	0,4	3	1
Год	0,3	18	2	0,8	54	2
<i>Станция «Ремонтное» (34 759)</i>						
Январь	0,8	9	4	0,08	0,05	0,2
Апрель	–0,1	1	–0,8	–0,09	0,2	–0,3
Июль	0,4	14	2	0,6	12	2
Октябрь	0,4	7	2	0,05	0,07	0,2
Год	0,4	30	2	0,6	42	2
<i>Станция «Таганрог» (34 720)</i>						
Январь	0,6	10	3	0,3	0,8	0,8
Апрель	0,07	0,4	0,4	0,3	2	0,8
Июль	0,5	21	3	0,7	12	2
Октябрь	0,4	12	2	0,5	5	1
Год	0,4	36	2	0,9	59	3
<i>Станция «Цимлянск» (34 646)</i>						
Январь	0,7	0,3	4	0,2	0,3	0,5
Апрель	0,08	0,5	0,5	0,3	2	0,8
Июль	0,5	18	3	0,6	11	1,9
Октябрь	0,5	12	2	0,3	2	0,9
Год	0,4	34	2	0,8	49	2
<i>Станция «Чертково» (34 432)</i>						
Январь	0,7	10	4	–0,05	0,02	–0,16
Апрель	0,1	0,6	0,6	2,8	2	0,8
Июль	0,4	12	2	0,5	6	1
Октябрь	0,4	11	22	0,4	4	1
Год	0,4	2	2	0,7	45	2

Примечания. *k* – коэффициент линейного тренда, °C/10 лет; *D* – доля суммарной дисперсии, объясняемая трендом, %; Δt – суммарное изменение температуры за указанный период, соответствующее линейному тренду, °C.

Полужирным шрифтом выделены статистически значимые изменения.

Изменение внутригодового распределения стока различно на реках исследуемого региона, как по степени значимости, так и по направлению линии тренда, что обусловлено различиями в водохозяйственной деятельности, площади водосбора рек и степени дренирования подземных вод. Для реки Дон по г. п. Казанская и Раздорская харак-

терно увеличение стока за холодный период года, что связано с увеличением температуры воздуха и числа оттепелей и, как следствие, поступлением талой воды в русло реки в период ледостава. На остальных реках с декабря по апрель за редким исключением наблюдается тенденция к снижению стока, а для реки Сал по имеющимся данным

(наблюдения на реке Сал начаты с 1983 г.) можно говорить о статистически значимом тренде. Расходы воды на Дону выше Цимлянского водохранилища за летний период увеличиваются, как и на большинстве незарегулированных рек исследуемой территории. Ниже плотины расходы воды напротив снижаются, что связано как с изменением климата, повышением температуры воздуха и, как следствие, испарения, так и с водохозяйственной деятельностью, заключающейся в регулировании стока с целью обеспечения нужд сельского

хозяйства и промышленности. Для остальных рек исследуемого региона характерно уменьшение расходов воды с ноября по апрель, т. е. в периоды зимней межени и весеннего половодья, что можно объяснить недостаточным дренированием реками подземных горизонтов. В мае, на спаде весеннего половодья, расходы воды имеют тенденцию к увеличению, в октябре также отмечается тенденция к увеличению расходов воды, что связано с увеличением количества осадков за этот месяц (табл. 3, см. табл. 2).

Таблица 2

Оценки линейного тренда для количества осадков для различных периодов

Месяц	1966–2019 гг.			1991–2019 гг.		
	k	D	Δt	k	D	Δt
<i>Станция «Гигант» (34 740)</i>						
Январь	1,3	0,9	7	1,0	0,1	3
Апрель	–1,9	1	–7	–7,4	9	–22
Июль	1,2	0,4	10	–1,9	0,4	–6
Октябрь	4,0	6	22	2,5	0,5	8
Год	–0,7	0,02	–4	–47,8	21	–144
<i>Станция «Ростов-на-Дону» (34 730)</i>						
Январь	1,4	0,5	8	8,8	7	26
Апрель	–2,6	22	–14	–7,2	6	–22
Июль	–2,7	2	–15	–1,2	0,1	–4
Октябрь	3,7	3	20	2,7	0,3	8
Год	–1,6	0,05	7	–35,0	5	–105
<i>Станция «Ремонтное» (34 759)</i>						
Январь	0,4	0,2	2	–2,2	2	–7
Апрель	–0,3	0,04	–2	–6,1	6	–18
Июль	1,2	0,5	7	14,6	20	44
Октябрь	0,5	0,1	2	–5,1	4	–15
Год	4,4	0,7	24	–7,6	0,6	–23
<i>Станция «Таганрог» (34 720)</i>						
Январь	4,4	5	24	14,9	14	46
Апрель	–0,7	0,3	–4	–4,0	3	–12
Июль	–6,7	9	–37	–0,5	0,02	–1
Октябрь	1,9	1	10	–5,5	3	17
Год	–1,1	0,02	6	–46,3	13	–139
<i>Станция «Цимлянский» (34 646)</i>						
Январь	2,8	4	15	3,8	2	11
Апрель	–3,2	5	–18	–1,1	0,4	–3
Июль	1,9	1	10	9,0	6	27
Октябрь	3,2	4	18	0,1	0	0,4
Год	0,9	0,02	5	4,7	0,2	14
<i>Станция «Чертково» (34 432)</i>						
Январь	0,8	0,2	4	9,8	12	29
Апрель	1,5	1	8	2,9	1	9
Июль	6,8	8	37	3,3	0,4	10
Октябрь	0,1	0,0001	0,8	–6,9	6	–21
Год	8,0	1	44	–17,5	2	–52

Примечания. k – коэффициент линейного тренда, мм/10 лет; D – доля суммарной дисперсии, объясняемая трендом, %; Δt – суммарное изменение количества осадков за указанный период, соответствующее линейному тренду, мм. Полужирным шрифтом выделены статистически значимые изменения.

Таблица 3

Изменение среднемесячных расходов воды рек

Пункт Характеристика	р. Дон – г. п. Казанская	р. Дон – г. п. Раздорская	р. Песковатка – г. п. Шумилинская	р. Сал – г. п. Бол. Мартыновка*	р. Сал – г. п. Балабинка**	р. Быстрая – г. п. Скольская	р. Быстрая – г. п. Анапский	Другие реки области		
								R_{cp}	t	$p\text{-value},$ %
I	0,34	0,37	0,66	-0,62	-0,49	-0,08	-0,09	-0,06	-2,1	5
II	0,36	0,08	0,57	-0,39	-0,22	-0,27	-0,25	-0,13	-4	0
III	0,06	-0,11	-0,21	0,19	-0,28	-0,26	-0,21	-0,19	-9,2	0
IV	-0,47	-0,28	0,03	0,06	-0,44	-0,1	-0,17	-0,06	-2,2	4
V	0,08	-0,21	0,7	-0,45	-0,64	0,33	0,22	0,24	4,5	0
VI	0,32	-0,09	0,72	-0,78	-0,5	0,47	0,29	0,03	1,0	35
VII	0,26	-0,29	0,79	-0,82	-0,62	0,66	0,38	-0,02	-0,6	54
VIII	0,27	-0,26	0,77	-0,72	-0,74	0,63	0,37	0,05	1,3	22
IX	0,33	-0,2	0,75	-0,66	-0,74	0,51	0,27	0,08	1,8	10
X	0,43	-0,13	0,7	-0,48	-0,5	0,33	0,18	0,13	3,1	1
XI	0,42	-0,15	0,68	-0,43	-0,63	-0,02	-0,09	0,04	1,1	28
XII	0,46	0,33	0,7	-0,52	-0,73	0,1	-0,05	-0,02	-0,8	46
Ср. год	-0,1	-0,15	0,51	-0,55	-0,74	-0,31	-0,28	-0,14	-5,0	0
Максимальный расход	-0,5	-0,3	-0,48	0,28	-0,39	-0,36	-0,36	-0,37	-20	0
Минимальный расход	–	–	0,77	-0,79	-0,72	0,8	0,46	0,15	5,2	0

Примечания. В таблице отдельно представлена оценка значимости коэффициента корреляции (R) линейного тренда на реках с наиболее существенными изменениями; незначимые коэффициенты корреляции на остальных реках осреднены (R_{cp}), оценка статистической значимости отличия среднего коэффициента корреляции от нуля выполнялась по формуле (2). Полуширинным шрифтом выделены статистически значимые значения.

* Наблюдения начаты с 2000 г. ** Наблюдения начаты с 1983 г. Для реки Сал в связи с короткой выборкой оценка значимости условна.

Анализ максимальных расходов воды показал статистически значимые отрицательные тренды на большинстве гидрологических постов со средним коэффициентом корреляции $-0,37$, значимые положительные тренды не выявлены. Летняя межень начинается в мае – июне и, как правило, является лимитирующей для водопользования, так как именно летом на большинстве рек регистрируются минимальные расходы и уровни воды. Минимальные расходы воды имеют положительные тренды – отметим, что после 1990 г. ни одна из рек не пересыхала, тогда как до 1990 г. в общей

сложности зарегистрировано 55 случаев пересыхания различных рек.

Уровеньный режим. Статистически значимое падение среднегодовых уровней воды характерно для 56% гидрологических постов, при этом средний коэффициент корреляции равен $0,66$ (что значительно больше по модулю, чем для среднегодовых расходов воды). Так, например, на р. Калитве в створе г. п. Погорелов падение уровней воды характеризуется значительно большими коэффициентами корреляции и угловыми коэффициентами, чем для расходов (рис. 2А).

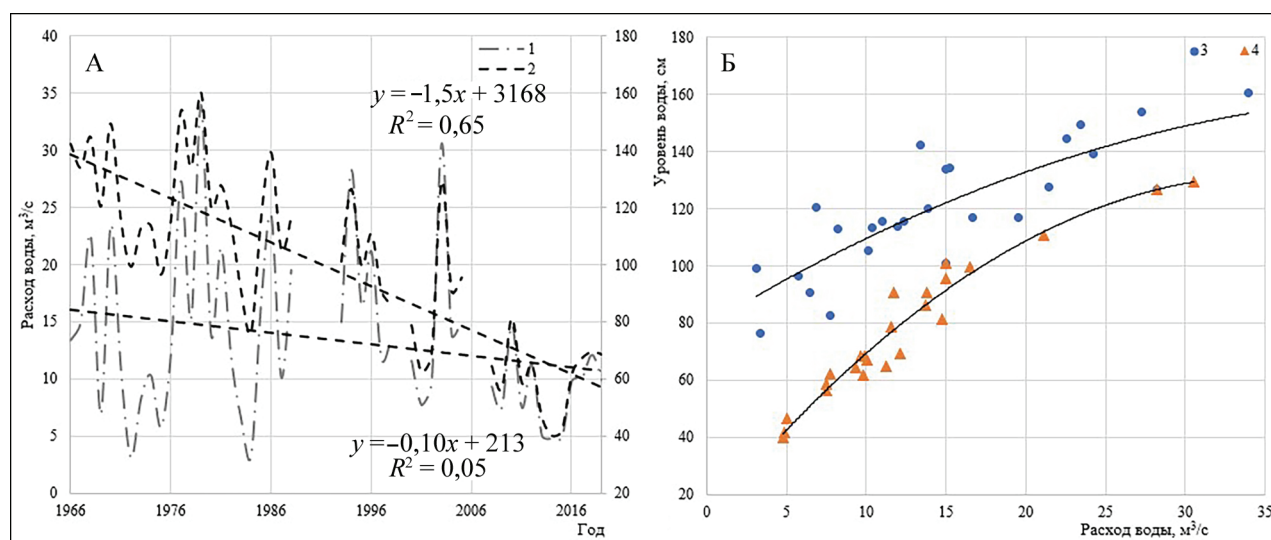


Рис. 2. Многолетние колебания гидрологических характеристик р. Калитвы на г. п. Погорелов: А – среднегодовой расход (1) и уровень воды (2); Б – зависимость среднегодового расхода и уровня воды в 1966–1990 (3) и в 1991–2019 гг. (4)

Fig. 2. Long-term fluctuations in hydrological characteristics of the Kalitva River at the Pogorelov hydrological station: А – average annual flows (1) and water levels (2); Б – long-term dependencies of average annual flows and water levels in 1966–1990 (3) and 1991–2019 (4)

Зависимость расхода воды от уровня в различные периоды существенно различается (рис. 2Б). Это обусловлено возможными изменениями ледового режима, связанными с увеличением температуры воздуха, а также деформациями речного русла.

Отмечаются и отдельные случаи роста среднегодовых уровней воды: ниже Цимлянского водохранилища скачкообразный рост уровней воды произошел в 1978–1981 гг., что совпадает с периодом модернизации и увеличения мощности гидроагрегатов [Гидроэлектростанции России, 1998]. Отметим также увеличение среднегодовых уровней воды на р. Егорлык, сток которой сильно зарегулирован водохранилищами, прудами и многочисленными оросительными системами [Сазонов и др., 2022]. Уровень воды по отношению к базовому периоду по гидрологическому посту Новый Егорлык вырос на один метр, расход же воды

увеличился незначительно. Подобное увеличение уровня может свидетельствовать о заиливании прудов и водохранилищ. В остальных случаях значимое увеличение уровня воды, как правило, имело место после строительства малых водохранилищ либо прудов (Глубокая, Березовая, Лихая). Среднемесячные уровни воды в случае падения среднегодовых значений снижаются за все месяцы года на 90% гидрологических постов, при этом это снижение гораздо более выраженное, чем снижение расхода воды.

Анализ наивысших уровней воды показал наличие отрицательных трендов со средним коэффициентом корреляции, равном $-0,35$ для всех рассмотренных водотоков, кроме р. Егорлык. Анализ минимальных уровней воды показал статистически значимую тенденцию к их снижению на 53% гидрологических постах со средним коэффици-

ентом корреляции 0,61. Статистически значимый рост минимальных уровней воды зарегистрирован по гидрологическим постам Астаховский (р. Глубокая), Индустрия (р. Большая), Антоновка (р. Березовая), Богураев (р. Лихая), Скосырская (р. Быстрая), Апанаскин (р. Быстрая), Владимирская (р. Кундрючья), Новый Егорлык (р. Егорлык). На оставшихся 27% гидрологических постов наблюдаются преимущественно статистически незначимые отрицательные тенденции.

В период половодья и формирования наибольших уровней воды нередко случаи возникновения ОГЯ (наводнений), поэтому в настоящей работе оценена их повторяемость. Для территории Ростовской области ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» установлены значения опасных уровней воды над нулем поста, при которых регистрируются наводнения. Повторяемость ОГЯ (наводнений), рассчитанная авторами, составляет от 0 до 26% (рис. 3). Среднее превышение опасных отметок – от 7 до 74 см.

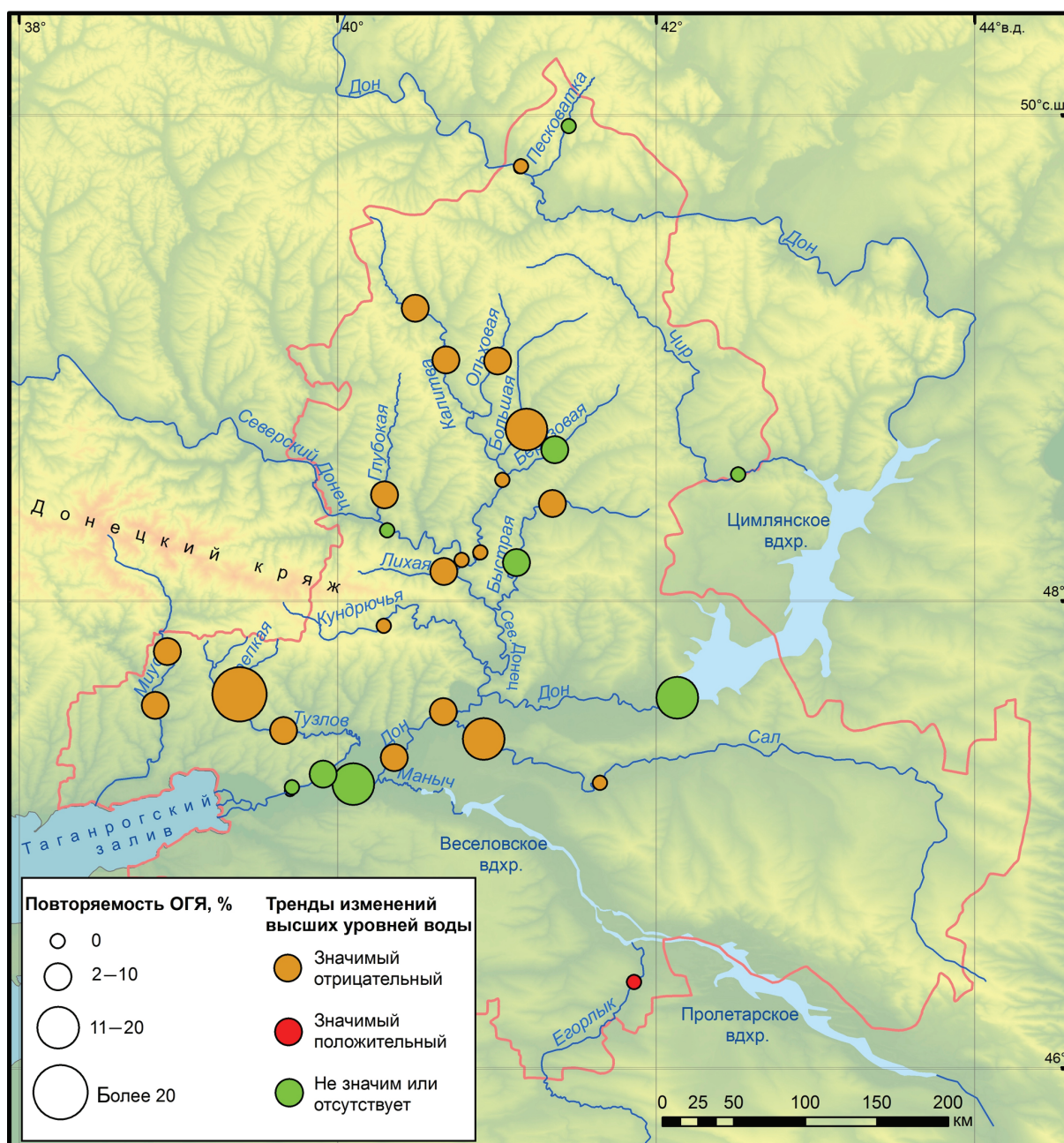


Рис. 3. Тренды изменений наибольших уровней воды за период весеннего половодья и повторяемость ОГЯ (наводнений) на территории Ростовской области по данным гидрологических постов

Fig. 3. Trends in changes in the highest water levels during the period of spring floods and the frequency of dangerous hydrological phenomena (floods) in the Rostov region according to data from hydrological stations

Отметим, что в связи с повсеместным снижением наибольших уровней воды следует ожидать снижения повторяемости наводнений и уменьшения зон затопления.

ВЫВОД

Выполненный анализ показал статистически значимое увеличение температуры воздуха, при этом стоит отметить, что оно идет медленнее, чем это предполагалось в ранее опубликованных работах [Лурье, 2010], за 54 года общее потепление составляет в среднем $0,38^{\circ}\text{C}/10$ лет. Годовые суммы осадков не увеличились, а на отдельных метеостанциях было отмечено их уменьшение за контрольный период (1991–2019). Прогнозы реакции речных систем на климатические изменения, данные в общем виде в [Лурье, Панов, 1999], оправдались.

Увеличение температуры воздуха при отсутствии значимых изменений количества осадков за весь рассматриваемый период свидетельствует об общем уменьшении увлажненности территории. В связи с этим на подавляющем большинстве рек наблюдается уменьшение среднегодовых расходов и уровней воды, при этом на р. Дон отмечается перераспределение стока внутри года. Изменение среднегодовых и среднемесячных уровней воды, как правило, более выражено по сравнению с изменением расходов воды, что обусловлено большим числом факторов, влияющих на уровенный режим. Максимальные расходы и наибольшие уровни воды снижаются на большинстве рассматриваемых постов, что умень-

шает вероятность возникновения ОГЯ, связанных с прохождением волны половодья. Минимальные расходы воды увеличиваются на большинстве рассмотренных гидрологических постов (в контрольном периоде пересыхание рек не наблюдалось), что благоприятно для водохозяйственной деятельности и гидроэкологической безопасности. Отметим, что, с другой стороны, продолжение роста температуры воздуха и уменьшения количества осадков, приводящее в свою очередь к уменьшению среднегодовых расходов и уровней воды, могут привести и к негативным изменениям в гидрологическом режиме, например к уменьшению водности рек, увеличению расходов на орошение и т. д.

По результатам работы создана «База данных характеристик водного режима водотоков и водоемов Ростовской области», которая включает сведения о 33 гидрологических постах. В ней представлены рассчитанные нормы среднегодовых и среднемесячных расходов воды рек; значения обеспеченных среднегодовых расходов воды рек; нормы среднемесячных и среднегодовых уровней воды рек; нормы среднемесячных и среднегодовых уровней воды водохранилищ; характеристики наибольших уровней воды (среднее значение, коэффициент корреляции линейного тренда, отметка ОГЯ, превышение отметки ОГЯ за период весеннего половодья и повторяемость ОГЯ); обеспеченные значения максимальных расходов воды рек; обеспеченные значения наибольших за год уровней воды на реках и водохранилищах Ростовской области [Пряхина и др., 2023].

Благодарность. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства природных ресурсов и экологии Ростовской области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агроклиматические ресурсы Ростовской области: справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 251 с.
- Базельюк А.А. Опасные гидрометеорологические явления на юге европейской территории России // Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей. М.: Триумф, 2012. С. 33–41.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П. и др. Современные и сценарные изменения стока Волги и Дона // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 6–23. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-1.
- Георгиади А.Г., Милюкова И.П., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейне Дона // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 651–662. DOI: 10.31857/S0321059620060061.
- Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н. и др. Оценка современных изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 46–55. DOI: 10.3103/S1068373919110037.
- Гидроэлектростанции России. М.: Типография Института Гидропроект, 1998. 467 с.
- Дмитриева В.А. Гидрологический режим рек Донского бассейна // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2018. № 4. С. 77–84.
- Итоговый отчет о выполнении работ по государственному контракту «Комплексная оценка тенденций изменения климатических условий на среднесрочный (до 2020 года) и долгосрочный (до 2050 года) периоды для предупреждения возможных негативных последствий для окружающей среды и экономики области». СПб.: Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, 2012. 97 с.
- Киреева М.Б., Илич В.П., Фролова Н.Л. и др. Вклад климатических и антропогенных факторов в формирование маловодного периода в бассейне р. Дон 2007–2015 гг. // Геориск. 2017. № 4. С. 10–21.
- Киреева М.Б., Фролова Н.Л. Современные особенности весеннего половодья рек бассейна Дона // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 1. С. 60–76.
- Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П. и др. Паводочный сток на реках Европейской территории России

- и его роль в формировании современного водного режима // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 4. С. 48–68. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-4-4.
- Кобышева Н.В., Наровлянский Г.Я. Климатическая обработка метеорологической информации. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 215 с.
- Корнилов А.Г., Лебедева М.Г., Решетников В.С. Тренды изменения годового и сезонного стока р. Северский Донец за период инструментальных гидрологических наблюдений (на территории Белгородской области) // Региональные геосистемы. 2017. Т. 38. № 4(253). С. 133–140.
- Литвинов П.В., Дмитриева В.А. Формирование ледового режима рек Верхнего Дона в современных климатических условиях // Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы: материалы Международной научно-практической конференции. Посвящается 85-летию факультета географии, геоэкологии и туризма ВГУ, Воронеж, 03–05 октября 2019 года. Т. 1. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2019. С. 448–452.
- Лурье П.М. Региональные особенности изменения климата на юге России и их последствия (на примере Ростовской области) // Географические исследования Краснодарского края: сб. науч. тр. Вып. 5. Краснодар: Кубанский гос. ун-т, 2010. С. 83–92.
- Лурье П.М., Панов В.Д. Влияние изменений климата на гидрологический режим р. Дон в начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. 1999. № 4. С. 90–97.
- Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: учебник. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2008. 408 с.
- Научно-прикладной справочник. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: РИАН, 2021. 190 с.
- Пряхина Г.В., Сумачев А.Э., Сыромятина М.В., Кузнецова М.Р. База данных характеристик водного режима водотоков и водоемов Ростовской области (RO HRWW): Патент РФ, № 2023623235; 2023.
- Сазонов А.Д., Закруткин В.Е., Решетняк О.С. Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений // Геология и геофизика Юга России. 2022. Т. 12. № 2. С. 114–127.
- Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации: учебник. Специальность «Гидрология» направления подготовки «Гидрометеорология». СПб.: Изд-во РГГМУ, 2007. 279 с.
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. Общее резюме. СПб.: Научные технологии, 2022. 124 с.
- Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А. и др. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. Т. 81. № 7. С. 14–26. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б. и др. Современные изменения характеристик максимального стока рек России // Вопросы географии. Водные проблемы и их решение. М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. Т. 157. С. 137–166. DOI: 10.24057/probl.geogr.157.7.
- Kireeva M., Frolova N., Rets E. et al. Evaluating climate and water regime transformation in the European Part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period, *Int. J. River Basin Management*, 2019a, vol. 18, no. 4, p. 1–12, DOI: 10.1080/15715124.2019.1695258.
- Kireeva M., Ilich V., Frolova N. et al. Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low-flow period in the Don-river basin during 2007–2016, *Geogr. Environ. Sustainability*, 2019b, vol. 12, no. 2, p. 62–77, DOI: 10.24057/2071-9388-2017-28.
- State of the global climate 2021, World Meteorological Association et al., 2022, 54 p., DOI: 10.13140/RG.2.2.23099.90400.
- Электронный ресурс*
Перечень опасных природных гидрометеорологических явлений (ОГЯ) на территории ЮФО и СКФО. URL: <https://yugmeteo.donpac.ru/hazards/> (дата обращения 02.03.2024).

Поступила в редакцию 12.11.2023

После доработки 10.08.2024

Принята к публикации 15.10.2024

HYDROLOGICAL REGIME OF RIVERS IN THE ROSTOV REGION UNDER THE CLIMATE CHANGE

A.E. Sumachev¹, G.V. Pryakhina², M.V. Syromyatina³, M.R. Kuznetsova⁴, A.A. Pavlovsky⁵,
T.N. Osipova⁶, I.G. Matveeva⁷, N.A. Lemeshko⁸

¹⁻⁸ St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences

⁴ Arctic and Antarctic Research Institute

¹ Department of Land Hydrology, Senior Lecturer, Ph.D. in Engineering; e-mail: a.sumachev@spbu.ru

² Head of the Department of Land Hydrology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: g65@mail.ru

³ Department of Land Hydrology, Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: m.syromyatina@spbu.ru

⁴ Department of Oceanology, Leading Engineer; e-mail: rotefliege@mail.ru

⁵ Acting Head of the Department of Climatology and Environmental Monitoring, Associate Professor,
D.Sc. in Geography; e-mail: a.a.pavlovsky@spbu.ru

⁶ Department of Climatology and Environmental Monitoring, Associate Professor,
Ph.D. in Geography; e-mail: t.osipova@spbu.ru

⁷ Department of Climatology and Environmental Monitoring, Senior Lecturer; e-mail: i.matveeva@spbu.ru

⁸ Department of Climatology and Environmental Monitoring, Associate Professor,
Ph.D. in Geography; e-mail: n.lemeshko@spbu.ru

Within the administrative boundaries of the Rostov region, changes in air temperature and precipitation, as well as flow rates and water levels for 1966–2019 were considered at 6 meteorological stations and 30 river hydrological posts. A statistically significant increase in average annual air temperature was revealed. Over 54 years, the increase in average annual air temperature has averaged 0,38°C/10 years, and it is most significant in January (0,68°C/10 years). No significant changes in the annual amount of precipitation were detected over the entire period; in general, they are not observed in individual months either. However, if we consider the last thirty years, there is a decrease in annual precipitation amounts in the region as a whole (–24,9 mm/10 years), which in turn manifests itself variously in different areas of the region. It is most significant in the south-western and southern regions: Taganrog (–46,3 mm/10 years), Rostov-on-Don (–35 mm/10 years), Gigant (–47,8 mm/10 years), and less pronounced in the southeastern regions: Remontnoe (–7,6 mm/10 years).

Due to a decrease in humidification of the territory, a decrease in average annual flow rates and water levels is typical to the vast majority of rivers, while there is a redistribution of the Don River flow within the year. It has been shown that the level regime of rivers largely depends on a complex of climatic, hydrological and water management factors, and its change, as a rule, is more pronounced than the changes in water discharge. The analysis of maximum water discharges showed the statistically significant negative trends at most hydrological stations with an average correlation coefficient of –0,33; no significant positive trends were identified. The analysis of the highest water levels showed the statistically significant negative trends also at most posts with an average correlation coefficient of –0,35. The frequency of floods, calculated over a long-term period, ranges from 0 to 26%, the average excess of critical levels is from 7 to 74 cm. Due to the widespread decrease in maximum flow rates and highest water levels, the probability of the dangerous hydrological phenomena associated with the passage of a seasonal flood wave is reduced. On the other hand, a continued increase in air temperature and a decrease in precipitation may cause a significant decrease in water flow of rivers in the future.

Keywords: river discharge, water level, the Lower Don River basin, floods

Acknowledgements. The study was financially supported by the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Rostov Region

REFERENCE

- Agroklimaticheskie resursy Rostovskoj oblasti [Agro-climatic resources of the Rostov region], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1972, 251 p. (In Russian)
- Bazelyuk A.A. [The dangerous hydrometeorological phenomena in the south of the European territory of Russia], *Prirodnye i sotsial'nye riski v beregovoi zone Chernogo i Azovskogo morei* [Natural and social risks in the coastal zone of the Black and Azov seas], Moscow, Triumf, 2012, p. 33–41. (In Russian)
- Dmitrieva V.A. Gidrologicheskii rezhim rek Donskogo basseina [Hydrological regime of the rivers of the Don River basin], *Proceedings of Voronezh State University, series: Geography, Geoecology*, 2018, no. 4, p. 77–84. (In Russian)
- Frolova N.L., Kireeva M.B., Kharlamov M.A. et al. Kartografirovaniye sovremennogo sostoyaniya i transformatsii vodnogo rezhima rek Evropeiskoi territorii Rossii [Mapping the current state and the transformation of water regime of rivers in the European territory of Russia], *Geodesy and Cartography*, 2020, vol. 81, no. 7, p. 14–26, DOI: 10.22389/0016-7126-2020-961-7-14-26. (In Russian)

- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B. et al. Stream-flow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data, *Water Resources*, 2022, vol. 49, no. 3, p. 333–350. DOI: 10.1134/S0097807822030046.
- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B. et al. [Modern changes of the maximum flow characteristics of Russian rivers], *Vodnye problemy i ih resheniya* [Water problems and their solution], Voprosy geografii, Moscow, Media-Press Publ., 2023, vol. 157, p. 137–166, DOI: 10.24057/probl.geogr.157.7. (In Russian)
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P. et al. Sovremennye i stsennyye izmeneniya stoka Volgi i Dona [Modern and scenario changes of flow of the Volga and Don], *Water sector of Russia*, 2017, no 3, p. 6–23, DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-1. (In Russian)
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and scenario changes of river runoff in the Don basin, *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, p. 913–923. DOI: 10.1134/S0097807820060068.
- Georgievskii V.Yu., Grek E.A., Grek E.N. et al. Assessment of modern changes in maximum river flow in Russia, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2019, no. 11, p. 739–745, DOI: 10.3103/S1068373919110037.
- Gidroelektrostantsii Rossii* [Hydroelectric power stations of Russia], Moscow, Printing house of the Hydroproject Institute, 1998, 467 p. (In Russian)
- Itogovy otchet o vypolnenii rabot po gosudarstvennomu kontraktu "Kompleksnaya otsenka tendentsii izmeneniya klimaticheskikh uslovii na srednesrochnyi (do 2020 goda) i dolgosrochnyi (do 2050 goda) periody dlya preduprezhdeniya vozmozhnykh negativnykh posledstviy dlya okruzhayushchei sredy i ekonomiki oblasti"* [Final progress report under the state contract "Comprehensive assessment of climate trends for medium-term (until 2020) and long-term (until 2050) periods to prevent possible negative impacts on the environment and the economy of the region"], St. Petersburg, The Voeikov Main Geophysical Observatory Publ., 2012, 97 p. (In Russian)
- Kireeva M., Frolova N., Rets E. et al. Evaluating climate and water regime transformation in the European Part of Russia using observation and reanalysis data for the 1945–2015 period, *Int. J. River Basin Management*, 2019a, vol. 18, no. 4, p. 1–12, DOI:10.1080/15715124.2019.1695258.
- Kireeva M., Ilich V., Frolova N. et al. Estimation of the impact of climatic and anthropogenic factors on the formation of the extreme low-flow period in the Don River basin during 2007–2016. *Geogr. Environ. Sustainability*, 2019b, vol. 12, no. 2, p. 62–77. DOI:10.24057/2071-9388-2017-28.
- Kireeva M.B., Frolova N.L. Sovremennye osobennosti vesenego polovod'ya rek basseina Dona [Modern features of the spring flood of rivers in the Don basin], *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2013, no. 1, p. 60–76. (In Russian)
- Kireeva M.B., Frolova N.L., Rets E.P. et al. Pavodochnyi stok na rekakh Evropeiskoi territorii Rossii i ego rol' v formirovaniі sovremennogo vodnogo rezhima [Flood flow on the rivers of the European territory of Russia and its role in the formation of modern water regime], *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2018, no. 4, p. 48–68, DOI: 10.35567/1999-4508-2018-4-4. (In Russian)
- Kireeva M.B., Ilich V.P., Frolova N.L. et al. Vklad klimaticheskikh i antropogennykh faktorov v formirovanie malovodnogo perioda v basseine r. Don 2007–2015 gg. [The contribution of the climatic and anthropogenic factors to the extreme low flow period in the Don River basin (2007–2015)], *Georisk*, 2017, no. 4, p. 10–21. (In Russian)
- Kobysheva N.V., Narovlyanskii G.Ya. *Klimaticheskaya obrabotka meteorologicheskoi informatsii* [Climatic processing of meteorological information], Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978, 215 p. (In Russian)
- Kornilov A.G., Lebedeva M.G., Reshetnikov V.S. Trendy izmeneniya godovogo i sezonnogo stoka r. Severskii Donets za period instrumental'nykh gidrologicheskikh nablyudenii (na territorii Belgorodskoi oblasti) [Trends in annual and seasonal runoff of the Seversky Donets River during the period of instrumental hydrological observations (within the territory of the Belgorod region)], *Regional'nye geosistemy*, 2017, vol. 38, no. 4(253), p. 133–140. (In Russian)
- Litvinov P.V., Dmitrieva V.A. [Formation of the ice regime of the Upper Don rivers under modern climatic conditions], *Global'nye klimaticheskie izmeneniya: regional'nye efekty, modeli, prognozy* [Global climate change: regional effects, models, forecasts], Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Posvyashchena 85-letiyu fakul'teta geografii, geokologii i turizma VGU, Voronezh, 03–05 oktyabrya 2019 goda, Voronezh, Tsifrovaya poligrafiya Publ., 2019, vol. 1, p. 448–452. (In Russian)
- Lur'e P.M. [Regional features of climate change in southern Russia and their consequences (case study of the Rostov region)], *Geograficheskie issledovaniya Krasnodarskogo kraya* [Geographical studies of the Krasnodar Krai], collection of scientific papers, Krasnodar, Kuban State University Publ., 2010, iss. 5, p. 83–92. (In Russian)
- Lur'e P.M., Panov V.D. An influence of climate changes on hydrological regime of the Don River in the early 21st century, *Russian Meteorology and Hydrology*, 1999, no. 4, p. 62–68.
- Malinin V.N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii* [Statistical methods of hydrometeorological information analysis], Textbook, Saint-Petersburg, RGGMU Publ., 2008, 408 p. (In Russian)
- Nauchno-prikladnoi spravochnik. Mnogoletnie kolebaniya i izmenchivost' vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiiskoi Federatsii* [Scientific and Applied Reference Book. Long-term fluctuations and variability of water resources and main characteristics of river flow of the Russian Federation], St. Petersburg, RIAL Publ., 2021, 190 p. (In Russian)
- Pryakhina G.V., Sumachev A.E., Syromyatina M.V., Kuznetsova M.R. *Baza dannykh kharakteristik vodnogo rezhima vodotokov i vodoemov Rostovskoi oblasti (RO HRWW)* [Database of water regime characteristics of watercourses and water bodies of the Rostov region (RO HRWW)], Patent RF, 2023, no. 2023623235. (In Russian)
- Sazonov A.D., Zakrutkin V.E., Reshetnjak O.S. Vremennaja izmenchivost' poverhnostnogo gidrohimičeskogo stoka v basseine reki Bol'shoj Egorlyk v usloviyakh antropogennogo vozdejstviya i klimaticheskikh izmenenij [Temporal variability of surface hydrochemical runoff in the Bolshoy Yegorlyk River basin under the anthropogenic impact and climate change], *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2022, vol. 12, no. 2, p. 114–127. (In Russian)

- Sikan A.V. *Metody statisticheskoi obrabotki gidrometeorologicheskoi informatsii* [Methods of statistical processing of hydrometeorological information], Textbook, "Hydrology" specialization of "Hydrometeorology" profile, St. Petersburg, RGGMU Publ., 2007, 279 p. (In Russian)
- State of the global climate 2021*, World Meteorological Association et al., 2022, 54 p., DOI: 10.13140/RG.2.2.23099.90400.
- Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii RF, Obshchee rezyume* [Third Assessment Report on Climate Change and its Impacts in the Russian Federation, General Summary], St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2022, 124 p. (In Russian)
- Web source*
Perechen' opasnykh prirodnkh gidrometeorologicheskikh javlenij (OJa) na territorii JuFO i SKFO [List of hazardous natural hydrometeorological phenomena (NH) within the territory of the Southern Federal District and North Caucasus Federal District], URL: <https://yugmeteo.donpac.ru/hazards/> (access date 02.03.2024).

Received 12.11.2023

Revised 10.08.2024

Accepted 15.10.2024